



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROYECTO FINAL DE CARRERA

Detector de capacidad parásita sonoro.

Parasitic capacitance detector sonorous

Estudios: Ingeniería de Telecomunicación

Autor: Cristian Molina Rodríguez

Director/a: Josep Maria Torrents Dolz

*Año:*2016

Índice general

Colaboraciones.....	2
Agradecimientos.....	3
Resumen del Proyecto.....	4
Resum del projecte.....	5
Abstract.....	6
1. Introducción.....	7
2. Teoría del comportamiento de la capacidad parásita.....	9
3. Programación y simulación de las ecuaciones.....	13
4. Diseño de los experimentos.....	24
5. Medidas de capacidades parásitas.....	29
6. "Pseudotheremin".....	42
7. Conclusiones.....	47
8. Referencias.....	48

Colaboraciones

Departament d'Enginyeria Electrònica (EEL)



Agradecimiento

Agradecer a todas las personas que han hecho posible la realización de este proyecto.

A Josep María Torrents Dolz, secretario del proyecto y encargado de ayudar en cada pequeño progreso realizado, invirtiendo su tiempo y dedicación.

A Manuel Vargas, por la ayuda obtenida con el material del laboratorio.

A María Isabel Mercader por la ayuda en el desarrollo teórico en la demostración de las ecuaciones.

Finalmente agradecer el apoyo de mi familia y amigos durante todo el desarrollo del proyecto.

Resumen del Proyecto

Se ha diseñado y montado un sistema de medida para caracterizar eléctricamente muestras de materiales. El sistema de medida genera o modifica un campo eléctrico existente en un volumen dado. Si las muestras en el interior del volumen se conectan a tierra, se modifica el campo eléctrico. El objetivo es caracterizar eléctricamente las muestras en el interior del volumen a través de medir las variaciones del campo eléctrico. Eventualmente, las muestras también pueden aislarse y sin conexión a tierra. Para ver la fluctuación en el comportamiento de las mismas.

El montaje se ha llevado a cabo con un coste bajo enfocando la efectividad científico-económico. Aprovechando el material disponible en el laboratorio, a partir de dos pares de cobre reciclado se ha medido la capacidad parásita entre ambos. Apantallando con diferentes materiales observamos la variación de la capacidad previamente nombrada.

Para hacer más atractivo y visual el proyecto si cabe, utilizando la placa base de un ordenador se ha creado un detector de variación de capacidad (a través de campo eléctrico) sonoro.

Para llevarlo a cabo se desarrolló una programación en Labview, solamente con el material del ordenador y el reciclado del laboratorio, se consigue variar el tono o volumen o ambos a la vez, en función del material que se aproxima.

Para comparar los datos reales con la idealidad se han caracterizado las ecuaciones con Matlab.

El comportamiento ha sido el esperado.

Resum del Projecte

S'ha dissenyat i muntat un sistema a mesura per caracteritzar elèctricament mostres de materials. El sistema de mesura genera o modifica un camp elèctric existent en un volum donat. Si les mostres en el interior del volum es connecten a terra, es modifica el camp elèctric. L'objectiu es caracteritzar elèctricament les mostres en el interior del volum a través de mesurar les variacions del camp elèctric.

Eventualment, les mostres també poden aïllar-se i sense connexió a terra. Per veure la fluctuació en el comportament de les mateixes.

El muntatge s'ha portat a terme amb un cost baix enfocant l'efectivitat científic-elèctrica. Aprofitant el material disponible en el laboratori, a partir de dos pars de coure reciclat s'ha mesurat la capacitat parasita entre els dos. Apantallant amb diferents materials observem la variació de la capacitat prèviament nombrada.

Per fer més atractiu i visual el projecte si cap, utilitzant la placa base d'un ordinador s'ha creat un detector de variació de capacitat (a través de camps elèctric) sonor.

Per portar-ho a terme es desenvolupa una programació en Labview, solament amb el material de l'ordinador i el reciclat del laboratori, s'aconsegueix variar el to o volum o ambdós a la vegada, en funció del material que s'aproxima.

Per comparar les dades reals amb la idealitat s'han caracteritzat les equacions amb Matlab.

El comportament ha estat l'esperat.

Abstract

It has been designed and mounted a measuring system to characterize electrically samples of materials. The measuring system generates or modifies an existent electric field in a given volume. If samples within the volume are earthed, the electric field is modified.

The aim is characterizes electrically the samples within the volume through measuring variations in electric fields. Eventually, samples can also be isolated and ungrounded. To see the fluctuation in the performance of these. The mounting is carried out with a low cost, focusing in scientific and economic effectiveness. Taking advantage of the available laboratory equipment, from two pairs of recycled copper was measured stray capacitance between them. Shielding with different materials observe the variation of the previously named capacity.

To make the project attractive and visual if it's possible, using the motherboard of a computer has created a detector capacitance change (through electric field) sound.

To carry out a program developed in Labview, only with the material of computer lab and recycling is achieved varying the tone or volume or both simultaneously, depending on the material approaches.

To compare the actual data with the ideality have been characterized equations with Matlab.

The behaviour was expected.

1. Introducción

Este proyecto nace de la curiosidad de un futuro ingeniero de telecomunicaciones y un doctor de telecomunicaciones, sobre una de las grandes mentes de la historia, Leon Theremin.

Leon Theremin, nacido en San Petersburgo el 15 de agosto de 1896. Un ingeniero e inventor que cursó estudios de Física. Interesado por el amplio abanico de posibilidades que ofrecían las ondas electromagnéticas que permitían el desarrollo de la radio. Se apasionó por la música y se autodenominó como "melómano".

Mientras manipulaba dos radios que no funcionaban correctamente, detectó un sonido que concluyó como una variación de ondas electromagnéticas. Referente a este hecho, nació su invento más conocido denominado "Theremin" en honor a su apellido.

Invirtió todo su tiempo libre en desarrollar y perfeccionar el "Theremin". Fue mejorado para conseguir interpretar complejas melodías, considerando a Leon Theremin como el precursor de la música electrónica.

El motivo de la elección de este proyecto nace de la idea de desarrollar un artilugio semejante al "Theremin" pero de bajo coste que se denominará "Pseudotheremin". Tendrá la capacidad de crear música partiendo de elementos electrónicos.

Para la realización del "Pseudotheremin" se utilizará material disponible en laboratorio, un ordenador y un programa con licencia de UPC.

Los objetivos del proyecto son:

Estudio de viabilidad y en su caso construcción y validación del "Pseudotheremin".

El segundo objetivo es conocer la diferencia entre los campos eléctricos existentes en interior de un edificio y en el espacio libre. Este segundo objetivo puede dar respuesta a las supersticiones presentes en la actualidad, sobre la afectación de los campos electromagnéticos en la salud de las personas.

El tercer objetivo es lograr diferenciar entre materiales conductores y aislantes mediante la variación del sonido producido por el "Pseudotheremin".

Como primer paso para la realización del "Pseudotheremin" se busca un modelo matemático que explique la evolución del campo eléctrico y la capacidad parásita. El estudio del funcionamiento del Pseudotheremin se encontrará en el capítulo 2 "Teoría del comportamiento de la capacidad parásita".

En el capítulo 3 "Programación y simulación de ecuaciones" se plantea programar las ecuaciones para la observación del comportamiento que produce el "Pseudotheremin" y en el capítulo 4 se diseñan los experimentos basados en el comportamiento observado en el capítulo 3 "Programación y simulación de ecuaciones".

Finalmente, los experimentos se realizarán en los capítulos 5 y 6.

2. Teoría del comportamiento de la capacidad parásita

El "Pseudootheremin" funciona mediante la variación de la capacidad parásita, igual que el Theremin.

En primer lugar, se estudia de forma teórica las capacidades parásitas producidas por los campos eléctricos para conductores de una geometría determinada.

Se concreta en el caso de dos conductores paralelos para poder comprobar experimentalmente el estudio teórico.

Conociendo el resultado del libro para diseño de chips "*Capacitance, Inductance and Crosstalk Analysis*", se desarrolla el estudio para obtener la ecuación.

Para realizar el desarrollo se utiliza la aproximación que supone una densidad de carga superficial en ambos conductores idéntica. Con esta aproximación pueden obtenerse los campos eléctricos producidos por ambos conductores, mediante la ley de Gauss.

Un conductor ira cargado, conectado a corriente. El otro se cargará por la influencia del primero, por ello estarán cargados de forma inversa, uno con $+Q$ y el otro con $-Q$.

De la misma forma ocurre con las densidades de cargas en los conductores, son opuestas.

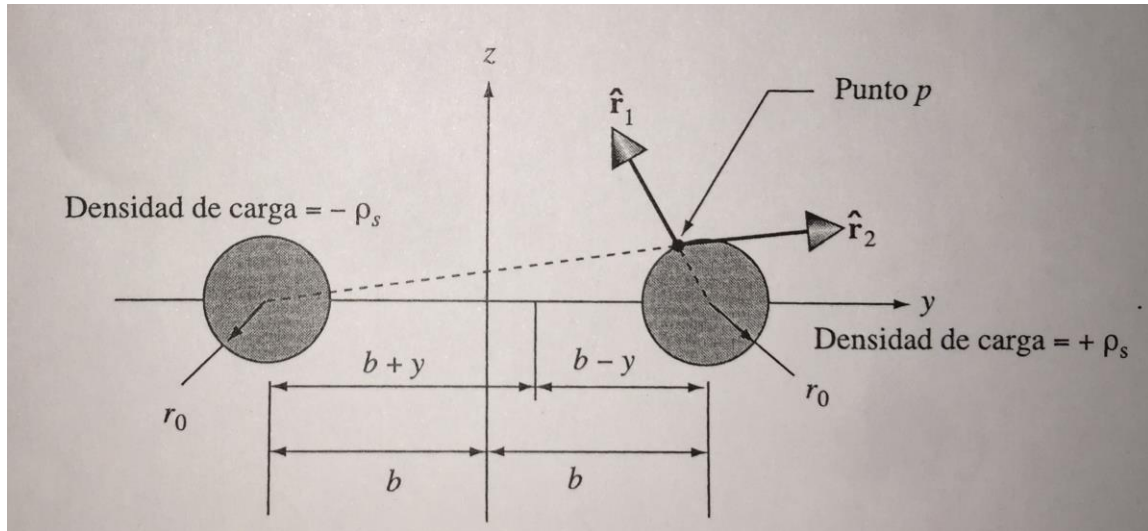


Figura 2.1: Corte en el plano x de dos conductores paralelos.

De esta forma la ecuación del campo eléctrico, será la resultante de la suma de los campos de ambos conductores:

Ecuación 2.1: Campo eléctrico creado por dos conductores.

$$E(r) = E_1(r) + E_2(r) = -\frac{\rho_\ell \hat{y}}{2\pi\epsilon(b-y)} - \frac{\rho_\ell \hat{y}}{2\pi\epsilon(b+y)}$$

Siendo: $\epsilon = \epsilon_{r(ef)} \epsilon_0$

$$\rho_\ell = \frac{Q}{L} \text{ Refiriéndose}$$

ϵ = Permitividad de un material. ϵ_0 = Constante de permitividad
 $\epsilon_{r(ef)}$ = Permitividad relative de un material.

Q = Carga total del conductor L = Longitud del conductor

ρ_s = densidad de carga superficial. \tilde{n}_ℓ = Densidad lineal de Carga a lo largo del conductor. Número total de Coulombs por unidad de longitud.

La aproximación de la densidad lineal de carga uniforme entre $-b$ y b se relaciona con la relación superficial de carga de la forma:

$$\rho_\ell = \int_{\phi=0}^{2\pi} \tilde{n}_s r_0 d\phi$$

Sabiendo que la Capacidad responde a la ecuación: $C = \frac{Q}{\Delta V}$

Se haya ΔV como la diferencia entre V_1 y $V_2 \rightarrow V_1 - V_2 = V_{12}$

Siendo V_{12} :

$$V_{12} = - \int_{-b+r_0}^{b-r_0} -\frac{\rho_\ell \hat{y}}{2\pi\epsilon(b-y)} \left[\frac{1}{b-y} + \frac{1}{b+y} \right] \cdot \hat{y} dy = \frac{\rho_\ell}{2\pi\epsilon} \left[\int_{-b+r_0}^{b-r_0} \frac{dy}{b-y} + \int_{-b+r_0}^{b-r_0} \frac{dy}{b+y} \right]$$

Resolviéndola se obtiene el resultado:

$$V_{12} = \frac{\rho_\ell}{\pi\epsilon} \ln\left(\frac{2b-r_0}{r_0}\right) \rightarrow \text{sustituyendo } \rho_\ell = \frac{Q}{L} \rightarrow V_{12} = \frac{Q}{L\pi\epsilon} \ln\left(\frac{2b-r_0}{r_0}\right) \text{ de aquí se obtiene:}$$

$$Q = \frac{L\pi\epsilon V_{12}}{\ln\left(\frac{2b-r_0}{r_0}\right)} \cdot \quad \text{Con } C = \frac{Q}{V_{12}} = \frac{L\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{2b-r_0}{r_0}\right)}$$

En la ecuación del libro se conoce $2b$ como la distancia entre conductores, como d . Con la aproximación $b \gg r_0$ puede despreciarse r_0 de la resta del numerador del logaritmo neperiano, quedando:

Ecuación 2.2: Capacidad por unidad de longitud de dos conductores paralelos iguales

$$\frac{C}{l} = \frac{\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{2b}{r_0}\right)} F/m$$

Para poder obtener un caso más real, no puede suponerse que la carga se distribuye uniformemente a través de la superficie de los conductores.

Para desarrollarlo de esta forma se utiliza el método de las imágenes, el resultado que se obtiene es el siguiente:

Ecuación 2.3: Capacidad por unidad de longitud de dos conductores iguales mediante teoría de imágenes

$$\frac{C}{l} = \frac{\pi\epsilon}{\ln\left\{ \frac{2b}{2r_0} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2b}{2r_0}\right)^2} \right] \right\}} F/m$$

Puede despreciarse la diferencia en el resultado final realizando el desarrollo de la ecuación mediante el teorema de las imágenes respecto al realizado en el apartado dos.

En el apartado tres “Programación y simulación de las ecuaciones”, se desarrollan las programaciones de cuatro ecuaciones que modelan el comportamiento de la capacidad parásita. Dos de las ecuaciones se desarrollan de forma práctica. Para el caso de dos conductores paralelos se desarrolla la ecuación 2.2.

3. Programación y simulación de las ecuaciones

Para definir el comportamiento de las ecuaciones se programan previamente al diseño de los experimentos.

El software que se utiliza es Matlab, aprovechando las diferentes licencias volátiles de la UPC. Por lo que puede accederse presencialmente desde diferentes ubicaciones.

Se programan las ecuaciones que modelan el comportamiento de la capacidad parásita en el orden que aparecen en el capítulo 2 del libro "*Capacitance, Inductance and Crosstalk Analysis*"

La ecuación a programar es la siguiente:

Ecuación 3.1: Capacidad por unidad de longitud de dos conductores iguales

$$\frac{C}{l} = \frac{\pi \epsilon_{r(eff)} \epsilon_0}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} F/m$$

Se adjuntan las imágenes de la programación y la ejecución:

```

1 function [ x, b ] = valores( Er, d , r, i )
2 %UNTITLED Summary of this function goes here
3 % Detailed explanation goes here
4 for k=1:i
5     b(k) = k*(d/i)
6     x(k) = (27.8*Er) / (log((k*(d/i))/r))
7
8
9     %(27.8*Er) (K*(d/i)) para k cada salto suma una porcion incremento
10
11 end
12 plot(b,x, '-go', 'linewidth',1.5, 'markersize',4, 'markeredgecolor', 'r', 'markerfacecolor', 'r')
13 end

```

Figura 3.1: Programación de ecuación 3.1(2 hilos Iguales)

```

ans =

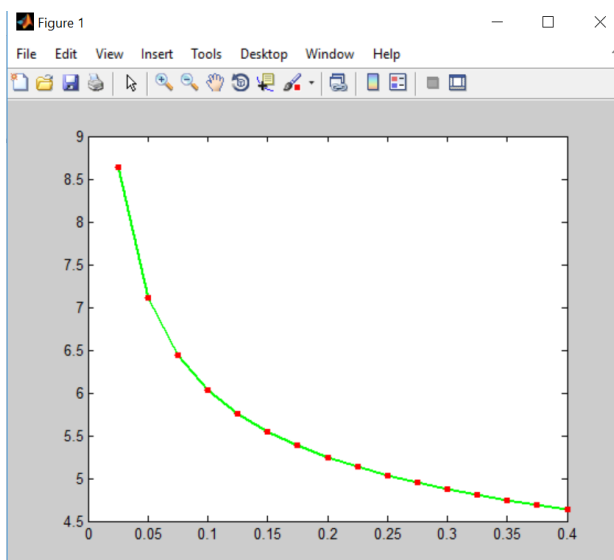
Columns 1 through 8

    8.6366    7.1063    6.4389    6.0367    5.7577    5.5482    5.3826    5.2469

Columns 9 through 16

    5.1328    5.0349    4.9495    4.8740    4.8065    4.7457    4.6905    4.6399

```



>> valgraf2 (1,0.4,0.001,16)

Figura 3.2: Ejecución y representación gráfica de Matlab de ecuación 3.1(2 hilos Iguales)(eje x distancia entre conductores en metros, eje y capacidad parásita pF)

27.8*1/ln(d/0.001) where d=0.025 to 0.475



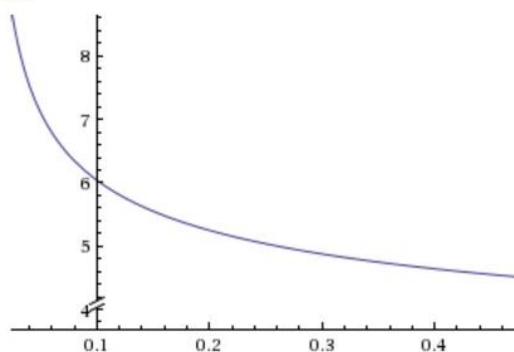
Examples Random

Input interpretation:

plot	$27.8 \times \frac{1}{\log\left(\frac{d}{0.001}\right)}$	$d = 0.025 \text{ to } 0.475$
------	--	-------------------------------

log(x) is the natural logarithm

Plot:



Enable interactivity

Arc length of curve:

More digits

$$\int_{0.025}^{0.475} \sqrt{1 + \frac{772.84}{d^2 (6.90776 + \log(d))^4}} dd \approx 4.18867...$$

Figura 3.3: Ejecución y representación gráfica Wolfram Alpha de ecuación 3.1(2 hilos Iguales) (eje x distancia entre conductores en metros, eje y capacidad parásita en pF)

La ecuación 3.1 se diseña teniendo en cuenta la idealidad de todo el sistema, suponiendo que ambos conductores tienen una conductividad idéntica, la distribución de cargas es uniforme, el aire es $\epsilon_r=1$, no existen interferencias y los conductores son infinitos.

Se deduce que el comportamiento del experimento práctico se acercará sin ser exacto al valor teórico, evolucionando de una forma aproximada al de la representación de la gráfica.

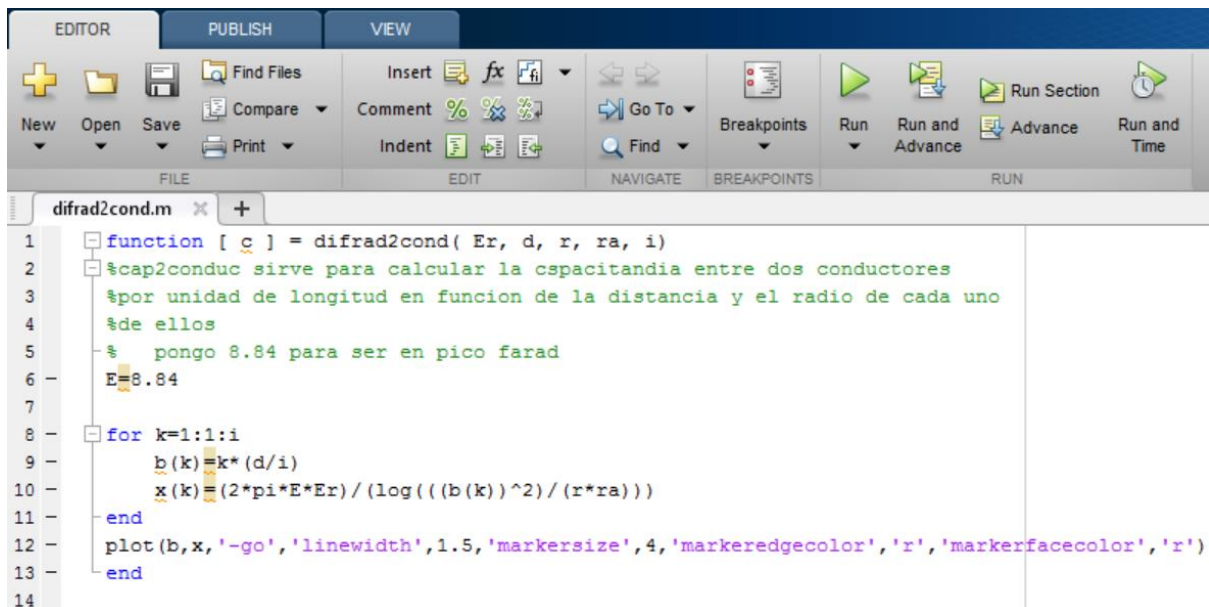
Así se consigue que al realizar las medidas a diferentes distancias los resultados formen una curva con una forma equivalente a la figura 3.3.

Las ecuaciones 3.2 y 3.3 se programan para caracterizar con mayor exactitud el comportamiento de la capacidad parásita, no desarrollándose de forma práctica.

La ecuación 3.2 modela el comportamiento de dos conductores paralelos e infinitos pero de diferente radio.

Ecuación 3.2: Capacidad entre dos conductores paralelos de diferente radio

$$\frac{C}{l} \approx \frac{2\pi\epsilon_{r(eff)}\epsilon_0}{\ln\left(\frac{d^2}{r_1 r_2}\right)} F/m$$

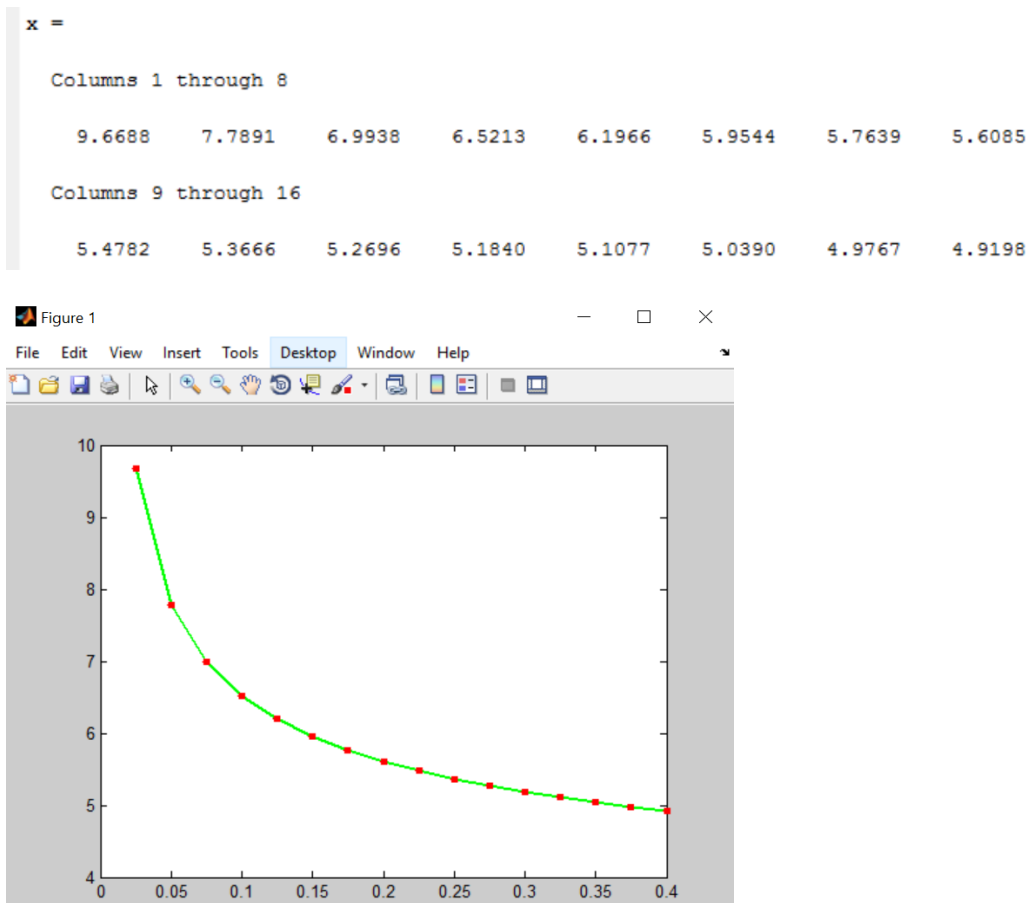


```

1 function [ c ] = difrad2cond( Er, d, r, ra, i)
2 %cap2conduc sirve para calcular la cspacitancia entre dos conductores
3 %por unidad de longitud en funcion de la distancia y el radio de cada uno
4 %de ellos
5 % pongo 8.84 para ser en pico farad
6 E=8.84
7
8 for k=1:1:i
9     b(k)=k*(d/i)
10    x(k)=(2*pi*E*Er)/(log((b(k))^2/(r*ra)))
11 end
12 plot(b,x,'-go','linewidth',1.5,'markersize',4,'markeredgecolor','r','markerfacecolor','r')
13 end
14

```

Figura 3.4: Programación de ecuación 3.2(2 hilos diferente radio)



```
>> difrad2cond(1,0.4,0.002,0.001,16)
```

Figura 3.5: Ejecución y representación gráfica de Matlab de ecuación 3.2

(eje x distancia entre conductores en metros, eje y capacidad parásita en pF)

Se considera inviable el desarrollo práctico de la ecuación 3.2 debido a la imprecisión por el aumento de variables, siendo los hilos de diferente radio e incrementando el nivel de ruido.

Teniendo en cuenta que, a menor radio, la afectación por el recubrimiento del par de cobre aumenta, se programa y muestra, como dato para la caracterización general de la capacidad parásita a través del campo eléctrico.

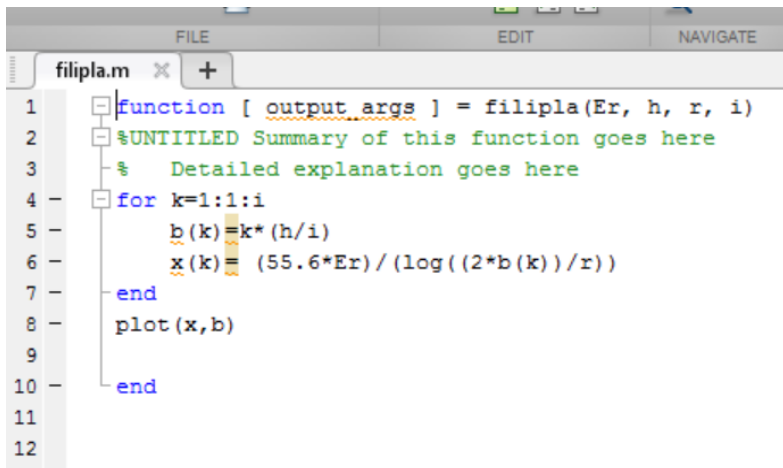
Los datos obtenidos permiten definir las variables que afectan en mayor magnitud a la capacidad parásita, por tanto, al campo eléctrico. Se comprueba la correcta programación, comparando los resultados en las ecuaciones 3.1 y 3.2 para el caso de radios iguales.

La ecuación 3.3 define el comportamiento que tiene la capacidad parasita existente entre un conductor rectilíneo e infinito y un plano de masa infinito conectado a tierra.

La ecuación 3.3 proporciona información sobre el comportamiento de la capacidad parásita útil para el último caso entre dos conductores y un plano.

Ecuación 3.3: Capacidad entre un hilo conductor y un plano de masa a tierra.

$$\frac{C}{l} \approx \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} F/m$$



```

1 function [ output_args ] = filipla(Er, h, r, i)
2 %UNTITLED Summary of this function goes here
3 % Detailed explanation goes here
4 for k=1:i
5     b(k)=k*(h/i)
6     x(k) = (55.6*Er) / (log((2*b(k))/r))
7 end
8 plot(x,b)
9
10 end
11
12

```

Figura 3.6: Programación de ecuación 3.3 (un hilo y un plano)

```

x =

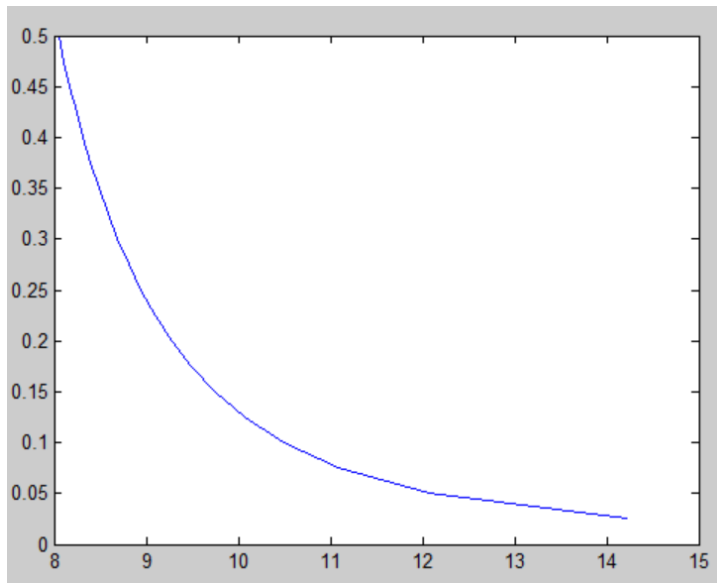
Columns 1 through 8

    14.2126    12.0734    11.0964    10.4939    10.0698     9.7479     9.4914     9.2799

Columns 9 through 16

     9.1010     8.9467     8.8115     8.6917     8.5843     8.4871     8.3987     8.3176

```



```
>> filipla (1,0.5,0.001,20)
```

Figura 3.7: Ejecución y representación gráfica de Matlab de ecuación 3.3(un hilo conductor y un oplano de masa a tierra)

(eje x distancia entre plano de masa y conductor en metros, eje y capacidad parásita en pF)

La ecuación 3.3 no se comprueba experimentalmente, pero permite observar el comportamiento asintótico de las ecuaciones que modelan el comportamiento de la capacidad parásita.

La ecuación 3.4 caracteriza el comportamiento de la capacidad parásita en el caso que, a dos conductores paralelos e infinitos, de la misma conductividad y de igual radio, con densidad superficial de carga uniforme, se les aproxime un plano de masa conectado a tierra.

Ecuación 3.4 : Capacidad entre dos conductores y un plano de masa a tierra

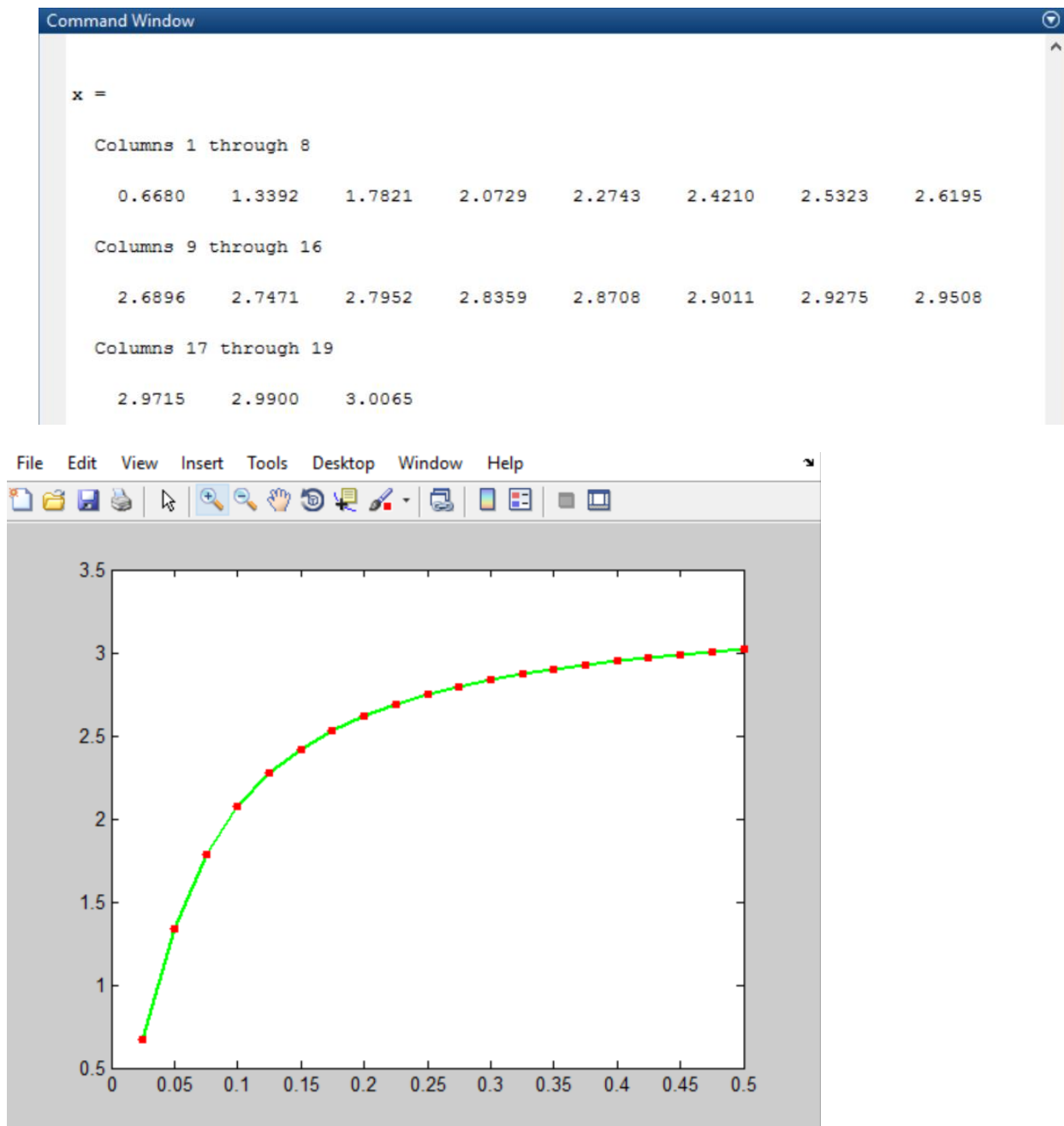
$$\frac{C}{l} \approx \frac{\pi \epsilon_{r(eff)} \epsilon_0 \ln \left[1 + \left(\frac{2h}{d} \right)^2 \right]}{\left[\ln \left(\frac{2h}{r} \right) \right]^2} F/m$$

```

1  function [ x, y ] = fil1pla(Er,h,d,r,i)
2  %UNTITLED Summary of this function goes here
3  % 2 hilos y un plano suponiendo 2h/r>>1 ya que el rqdio del hilo
4  % utilizado es de medio milimetro, fijada una distancia puesta como
5  % variable y un radio, nos represenará la gráfica en funcion de la
6  % distancia del conductor absoluto k acerquemos suponeindo un plano de
7  % masa infinito, no aproximable al brazo humano pero podremos hacerun
8  % calculo aroximado de la diferencia y perdida or la no idealidad del
9  % sistema y de nuestra conductividad.
10 - for k=1:i
11 -     b(k)=k*(h/i)
12 -     x(k)=(27.8*log(1+((2*b(k))/d)^2))/((log((2*b(k))/r))^2)
13 - end
14 - plot(b,x,'-go','linewidth',1.5,'markersize',4,'markeredgecolor','r','markerfacecolor','r')
15
16
17 - end

```

Figura 3.8: Programación de ecuación 3.4 (2 hilos y un plano)

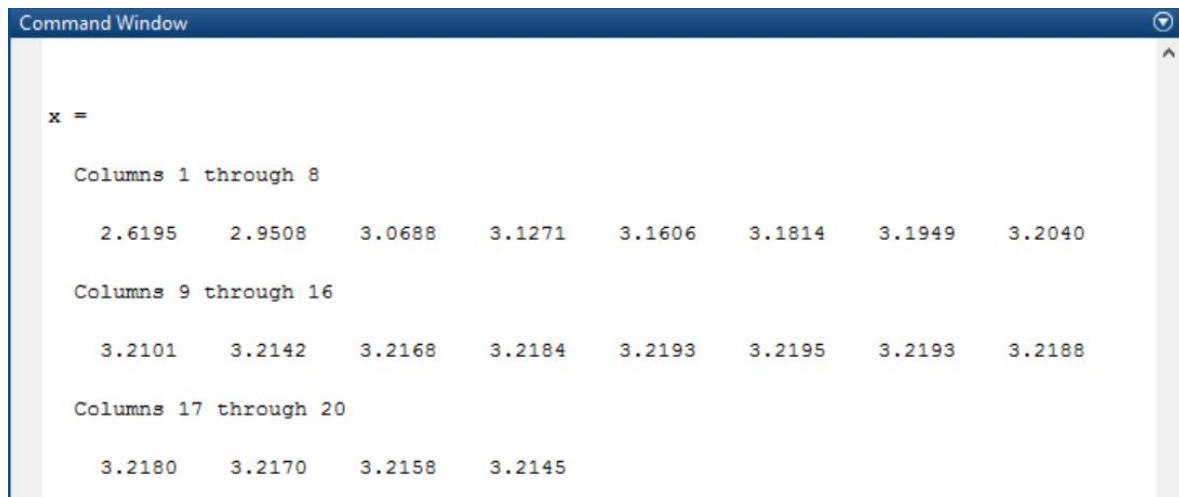


>>fil1pla (1,0.5,0.075,0.001,20)

Figura 3.9: Ejecución y representación gráfica de Matlab de ecuación 3.4

(eje x: distancia vertical en metros entre plano de masa y par de conductores paralelos,
eje y: capacidad parásita en pF)

Los logaritmos de la ecuación crecen a diferente velocidad, apareciendo puntos de inflexión, discontinuidades, como se muestra en la figura 3.10, a partir del valor 3.2195 comienza a decrecer.



```
>> fil1pla (1,4,0.075,0.001,20)
```

Figura 3.10: Ejecución de Matlab de ecuación 3.4

Se comprueba esta hipótesis ejecutando en Matlab la ecuación con grandes distancias entre el plano y los conductores. Apareciendo que tiene un comportamiento inverosímil respecto al ideal, reduciendo el valor por el crecimiento del logaritmo que divide, cuando debería tender a estabilizarse.

Tras veinte ejecuciones con valores superiores al metro se deduce que la ecuación caracteriza el comportamiento de la capacidad parásita para distancias relativamente cortas, inferiores al metro.

Los instrumentos de medida no tienen sensibilidad suficiente para realizar una prueba a grandes distancias debido a que la afectación de ruido sería muy superior al de la señal.

Para corroborar la hipótesis y asegurar que no es un fallo en la programación de Matlab, se inserta esta ecuación en Wolfram Alpha y se comprueba que el comportamiento de la ecuación en la gráfica es el esperado, y tiene puntos de discontinuidad.

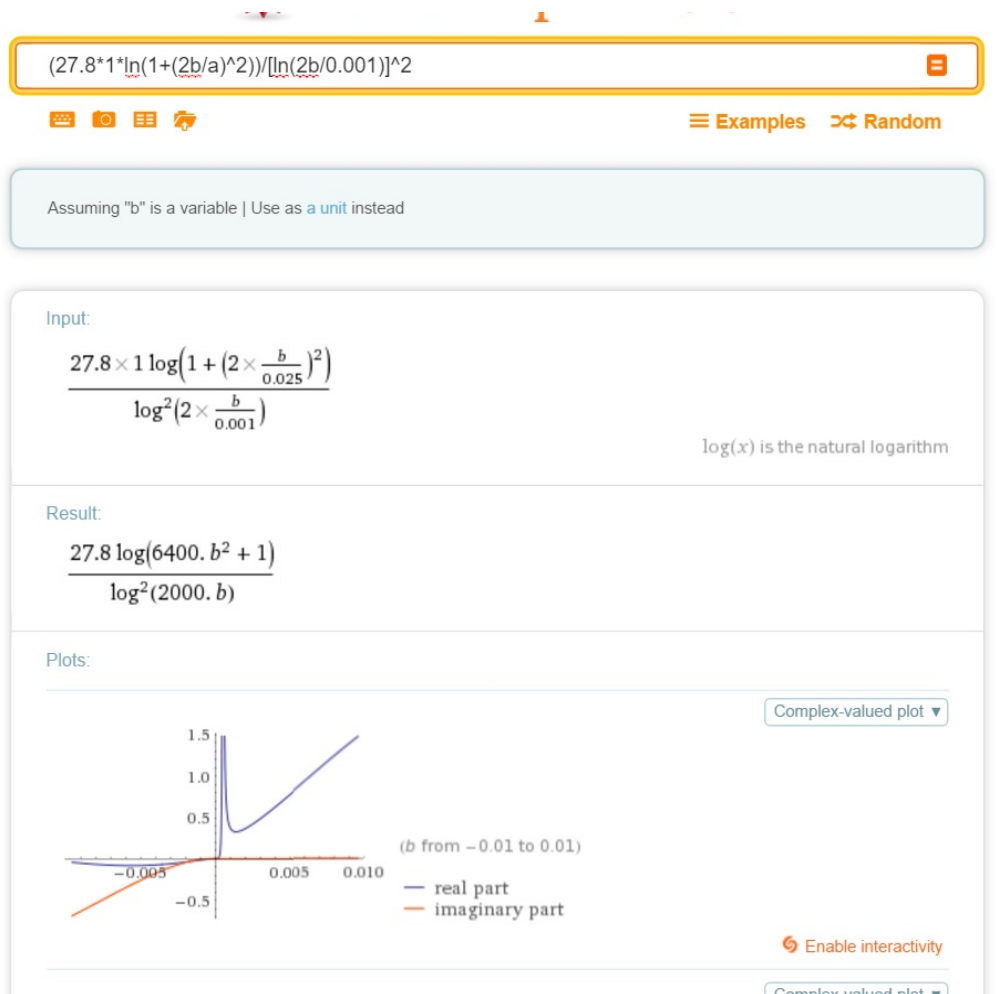


Figura 3.11: Ejecución y representación gráfica Wolfram Alpha de ecuación 3.4(2 hilos Iguales y un plano)

(eje x: distancia vertical en metros entre plano de masa y par de conductores paralelos, eje y: capacidad parásita en pF)

Para asegurar al 100% aun habiéndose realizado la comprobación con Wolfram Alpha, se sustituyen valores en la ecuación y los valores coinciden con Matlab, se confirma la correcta programación.

4. Diseño de los experimentos

Se diseñan tres experimentos prácticos aprovechando la información obtenida de la programación realizada en el apartado 3 "Programación y ejecución de las ecuaciones."

Experimento 1

Se realiza la medida de la capacidad parásita existente entre dos conductores rectilíneos y paralelos de igual radio, modelados en la ecuación 3.1.

El experimento se realiza sobre una base de madera, que permite la configuración de diferentes distancias entre los conductores paralelos.

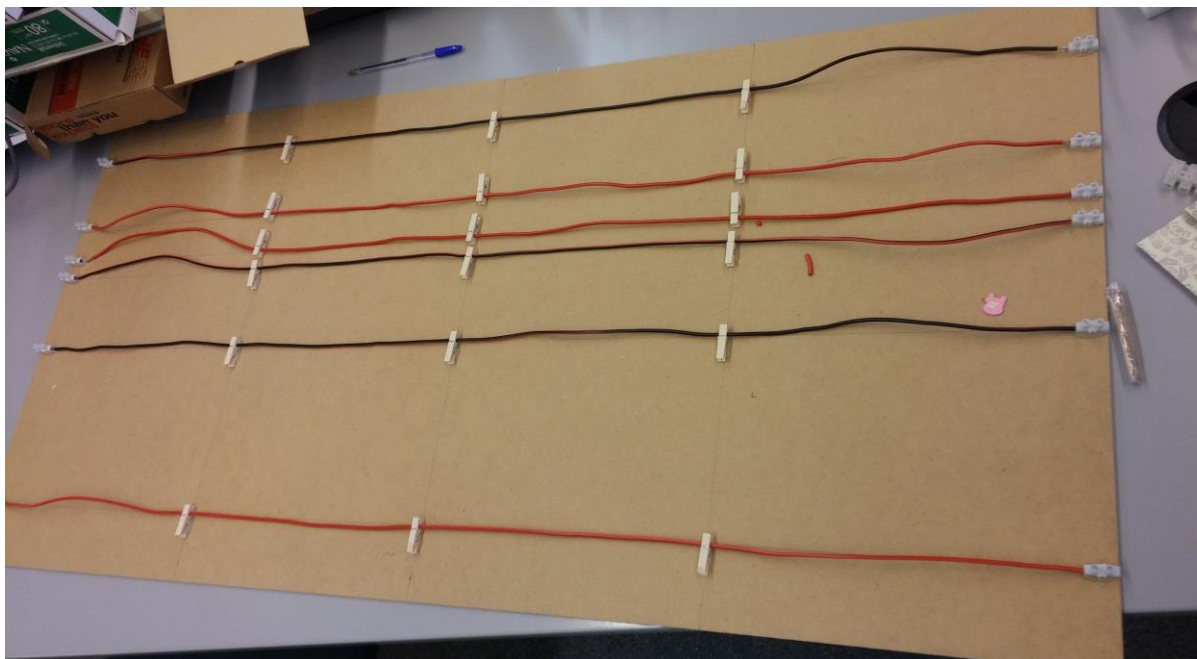


Figura 4.1: Tabla con todas las interdistancias posibles

Analizando los valores obtenidos en la ejecución de Matlab de la ecuación 3.1, se aprecia que los valores más significativos son los de menor distancia entre conductores.

Los valores de mayor relevancia son los comprendidos entre 2,5 cm y 12,5 cm, buscando una configuración que tenga el mayor número de valores comprendidos entre ambos.

El experimento se realiza utilizando pequeñas pinzas de madera encoladas a la tabla, aprovechando es aislante de la madera de forma que afecte lo mínimo posible al campo eléctrico creado por los conductores. Despreciándose la afectación de las pinzas a la capacidad parásita.

Las opciones planteadas para la configuración de la posteriores interdistancias disponibles son las siguientes: (las distancias se expresan en centímetros)

- 1.- 2,5;5;7,5;10;15;17,5;20;25;30
- 2.- 2,5;5;7,5;10;15;17,5;20;30;40
- 3.- 2,5;5;7,5;10;12,5;15;17,5;22,5;25;27,5;30;37,5
- 4.- 2,5;5;7,5;15;17,5;20;22,5;27,5;30;32,5;37,5
- 5.- 2,5;5;7,5;10;12,5;17,5;20;22,5;25;27,5;37,5
- 6.- 2,5;5;7,5;10;12,5;15;17,5;20;22,5;30;32,5;37,5
- 7.- 2,5;5;7,5;10;12,5;15;17,5;20;22,5;30;35

Se decide utilizar la sexta configuración ya que permite configurar todas las distancias entre 2,5 cm y 22,5 cm en saltos de 2,5 cm.

Se realizan las medidas en laboratorio y en espacio abierto, pudiéndose evaluar la afectación por el entorno electrónico que rodea el experimento.

Experimento 2

En el experimento dos se mide la variación de la capacidad parásita entre dos conductores, cuando a los dos conductores se les aproximan planos de masa de diferente conductividad.

Se utiliza la tabla del experimento 1 para realizar el segundo experimento, aprovechando las gráficas y datos obtenidos en Matlab de la programación de la ecuación 3.4.

Se fijan los conductores paralelos en 2,5 cm, 5 cm y 7,5 cm. Se realizan las medidas para las tres distancias de forma independiente, acercando un plano de masa conductor conectado a tierra. Para las distancias de: 0,3 cm, 2,5 cm, 5 cm, 7,5 cm, 10 cm y 15 cm.

Utilizando las medidas obtenidas se modela el comportamiento de la capacidad parásita.

Se comprueba la fluctuación de la capacidad parásita para el caso de conectar a tierra planos de diferente conductividad. Se observa un comportamiento asintótico similar al programado.



Figura 4.2: Tabla con plano de masa conductor conectado a tierra.

Experimento 3

El tercer experimento es la realización de un detector de variación de capacidad parásita sonoro, nombrado en la introducción "Pesudotheremin".

El Theremin realiza el batido de dos frecuencias, la señal audible es la diferencia de las dos frecuencias, por lo tanto, de alta frecuencia.

Los componentes para fabricar un Theremin convencional son de alta frecuencia encareciendo el montaje.

Se decide utilizar material reciclado y una programación para realizar el "Pseudotheremin", reduciendo el coste. Se aprovecha los materiales de audio frecuencia, más económicos, concretamente la placa base de un Pc y la programación en Labview.

Se conecta un hilo conductor directamente a la red eléctrica en un extremo y el otro extremo al aire. Un segundo hilo conductor a la entrada de audio del PC en un extremo, y el otro extremo al aire. La programación en Labview convertirá en un tono audible la señal de entrada de audio, generada por la variación de campo eléctrico que produce la variación de la capacidad parásita.

Aprovechando que la señal de entrada de audio es estéreo, se conecta de forma independiente un tercer hilo conductor a la red eléctrica y un cuarto hilo conductor a la entrada de audio del PC.

La señal del cuarto hilo conductor conectado a la entrada de audio del Pc, mediante la programación de Labview, regulará el Nivel de volumen de la señal audible.

Utilizando los datos obtenidos de la programación de la ecuación 3.1, se decide fijar una distancia fija de 10 cm entre los pares conectados a tierra y los pares conectados a la entrada de audio del PC.

Se utiliza la distancia de 10 cm que presenta una capacidad parásita elevada (antes de la curva de bajada) y permite introducir diferentes materiales, incluso el cuerpo humano.

Se utiliza el osciloscopio para comprobar el correcto funcionamiento del "Pseudotheremin", observando que la variación de volumen y Pitch concuerda con la variación de la señal de entrada.

Utilizando el “Pseudotheremin” se puede diferenciar entre materiales conductores y aislantes, siendo una utilidad electrónica.

5. Medidas de capacidades parásitas.

La parte experimental en el proyecto "Pseudotheremin. Detector de capacidad parásita sonoro" tiene un peso que supera el 30%, siendo dos de los capítulos más importantes.

Experimento práctico 1

El experimento 1, se realizan las medidas de la capacidad parásita que modela la ecuación 3.1, se diseña de forma teórica en el capítulo 4, en el apartado "diseño del experimento 1".

Las magnitudes medidas son del orden del picofaradio, se deduce por el amplio número de factores, la relación ruido señal se ve afectada por el mínimo error de medida.

Se espera un comportamiento asintótico equivalente al de la programación de la ecuación 3.1, pudiendo obtener un porcentaje de error elevado. Esperándose la variación de capacidad parásita en función de la distancia entre conductores modele una curva similar a la gráfica de la Figura 3.2.

El experimento se construye sobre una tabla de 1,20 metros por 0,6 metros de ancho, utilizando un factor de 0,83 se normaliza las medidas a picofaradios por metro. Se utiliza la longitud completa de la tabla en el montaje, aumentando el nivel de señal, mejorando la SNR.

Se realizan las medidas con conductores de un metro, comprobando la hipótesis, mayor longitud de conductores, ofrece mejor SNR.

Todas las medidas del experimento 1, se realizan en laboratorio y espacio exterior, conociendo el orden de magnitud de error producido por los elementos electrónicos.

Los instrumentos utilizados para medir son: analizador de impedancias HP4912A para las medidas en laboratorio y las pinzas LCR Elite1 para exterior.

En la realización de medidas en interior se conectan los cables apantallándose entre sí, disminuyendo el ruido en la conexión entre la tabla y el analizador.

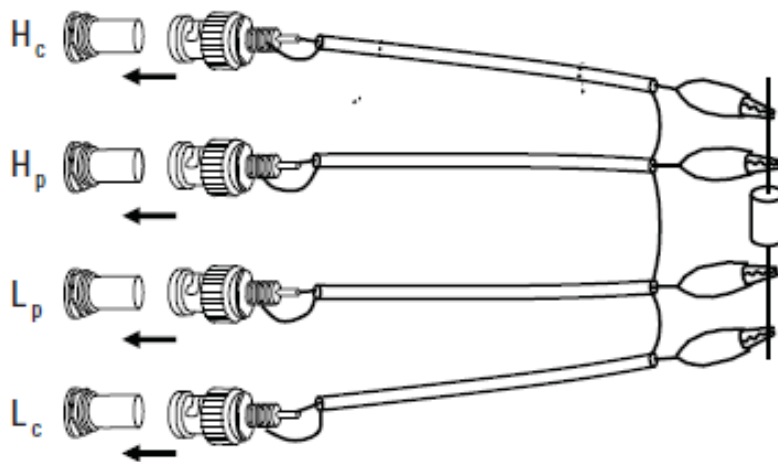


Figura 5.1: Conexión cables apantallándose

Se realiza una introducción del funcionamiento del analizador:

La figura 5.2 muestra el circuito equivalente simplificando las conexiones al máximo para facilitar el desarrollo teórico del funcionamiento.

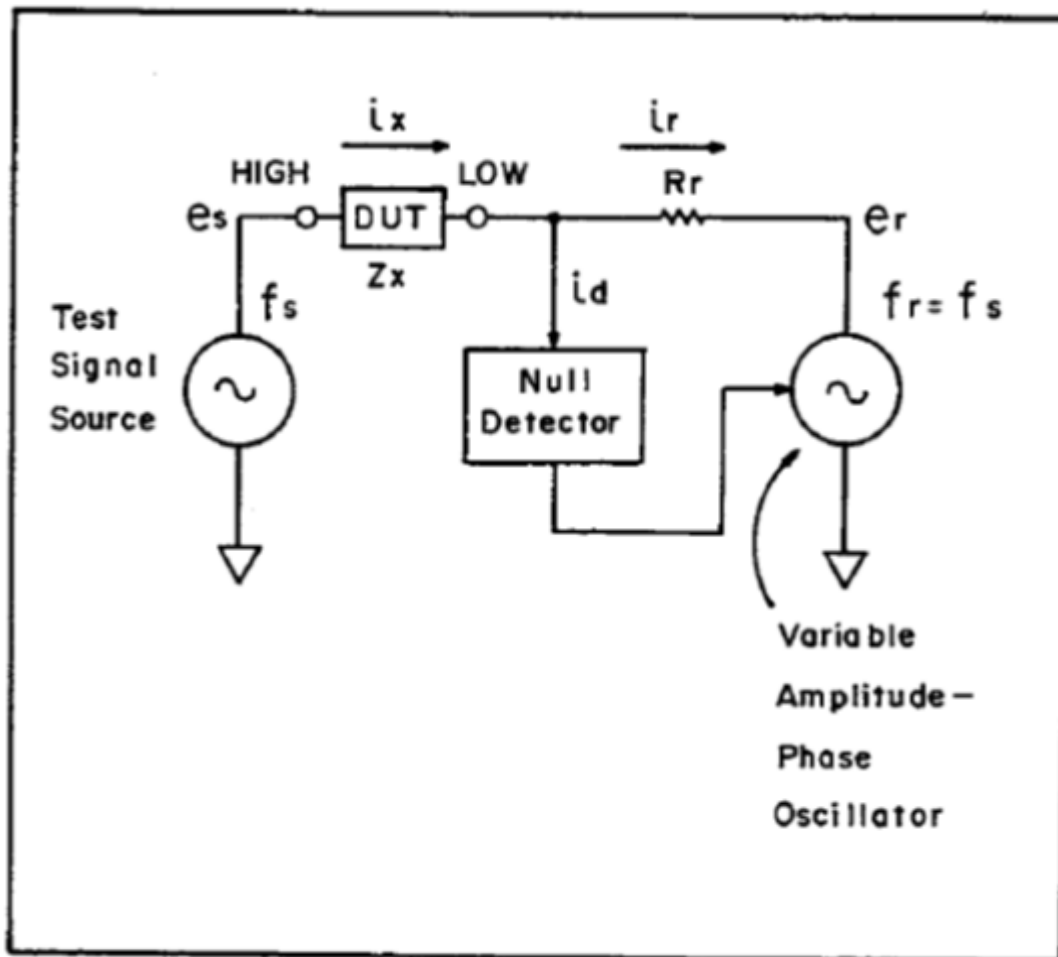


Figura 5.2: Circuito equivalente analizador de impedancia.

En el circuito de la figura 5.1 y de la figura 5.2 se observan cuatro terminales que se apantallan para eliminar las capacidades parásitas.

Los 4 terminales son:

- H_c que es un generador de funciones
- H_p que es un multímetro
- L_c que se puede considerar un shunt de corriente, una resistencia de referencia para medir la corriente
- L_p que es un cortocircuito virtual

Cuando el lazo de realimentación del puente auto-balanceado (el circuito de medida del H_p) está en realimentación negativa, L_p corresponde a un cortocircuito virtual.

Es en la figura 5.2 corresponde a HC (high current) en la figura 5.1, quien envía señal. HP se halla entre high y masa (low) funcionando como un tester. HC genera una corriente y HP mide la tensión entre high y tierra.

Cercano al Low se halla LP y LC . En LC se encuentra la resistencia de referencia R_r , conocida, siendo parte del instrumento. La resistencia R_r está en contacto con Low y con un generador de funciones controlado por el terminal LP . En el circuito de la figura 5.2 LP es I_d , conectando Low con Null detector ($i_d = L_p$ Low potencial).

Trabajando en lazo realimentado (Null detector funciona como un AO en lazo realimentado en realimentación negativa) el detector de nulo modula el generador de funciones controlándolo, produciendo en Low una tensión 0, se conoce como puente auto-balanceado.

Para realizar las medidas, se generan 0 voltios en Low inyectando corriente a la resistencia de referencia. Para generar esta corriente, Null detector modula la tensión E_r generando la tensión equivalente provocando el 0 en Low.

Conociéndose R_r , que es del instrumento y E_r generada para el balanceo, se conoce la intensidad que circula por R_r . Se obtiene la impedancia D_{ut} (Device Under Test), debido a que la tensión en High es conocida.

Se conoce como puente debido a que D_{UT} (Device Under Test) une ambas partes, haciendo de "puente". El circuito está auto-balanceado ya que el puente provoca la tensión 0.

El analizador de impedancia presenta una sensibilidad de 0,001pF y una exactitud de 0,15%.

En la tabla de la figura 5.3 se presentan los valores obtenidos en las medidas realizadas en el interior del laboratorio:

Distancia (cm)	Capacidad (pF para 1,2 m)	Capacidad (medida pF/m)	Capacidad (teórica pF/m)	Error%
2,5	11,439	9,5325	8,6366	-10,37
5	8,155 /8,6	6,98	7,1063	1,78
7,5	6,327	5,2725	6,4389	18,11
10	5,15	4,29167	6,0367	28,91
12,5	4,532	3,7767	5,7577	34,41
15	4,04	3,3667	5,5482	39,32
17,5	3,503	2,91917	5,3826	45,77
20	2,969	2,47417	5,2469	52,85
30	2,013	1,6775	4,8740	65,58
47,5	1,118	0,93167	4,5106	79,34

Figura 5.3: Tabla de valores obtenidos en laboratorio.

Se cumple la hipótesis, a menor distancia entre conductores los resultados obtenidos son más parecidos al resultado teórico.

El resultado a 2,5 centímetros presenta un error de 10% superior al valor teórico contra toda hipótesis.



Figura 5.4: Medida en laboratorio a 2,5 cm

A 5 centímetros se presenta el menor error de todas las medidas siendo inferior al 2%. Se descarta esta distancia para el experimento del "Pseudotheremin" por la dificultad de introducir elementos entre los conductores.

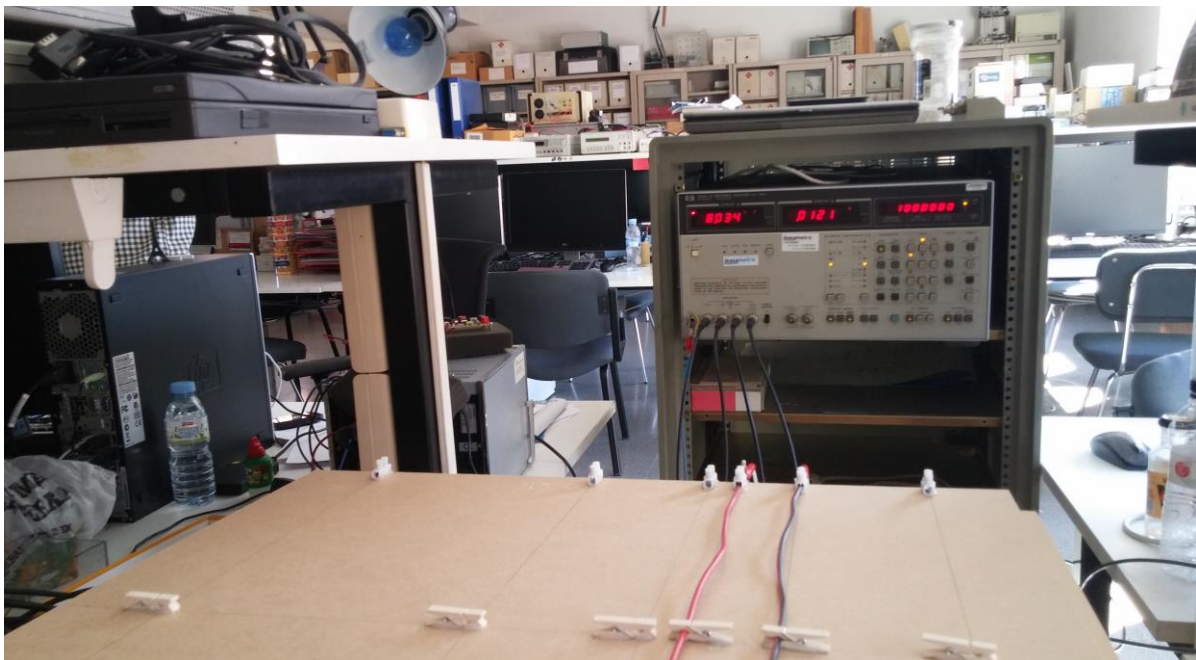


Figura 5.5: Medida en laboratorio a 5 cm

El error a 7,5 centímetros supera el esperado, siendo superior al 18%, ocasionado por lo elementos del laboratorio.

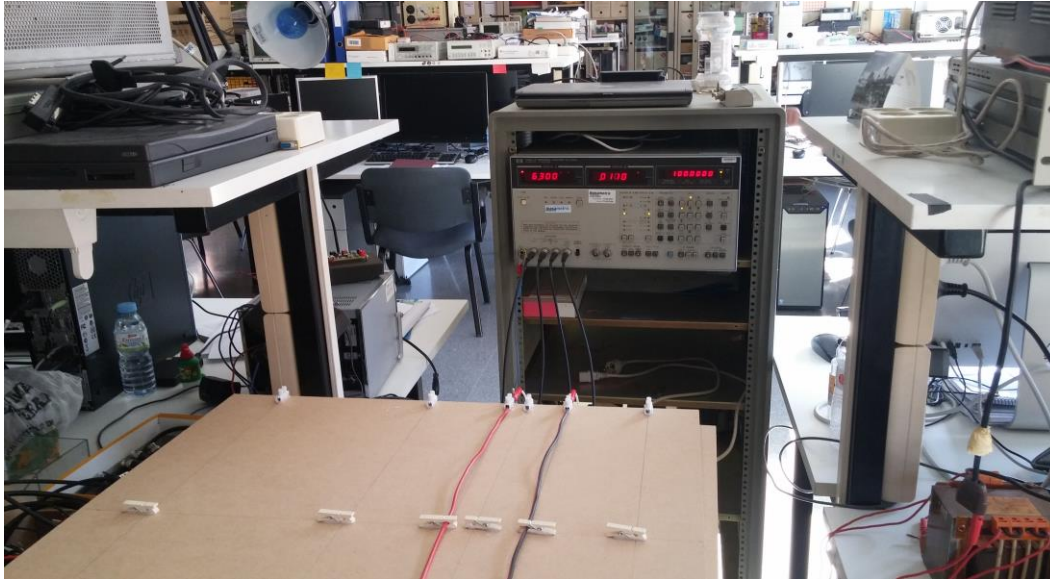


Figura 5.5: Medida en laboratorio a 7,5 cm

Las medidas entre 10 y 17,5 centímetros, el error no supera el 45% creciendo el porcentaje forma constante.

Superando los 20 centímetros el error se dispara, tras diversas hipótesis se escoge el valor medido como el valor correcto, ya que esta ecuación fue diseñada para distancias cortas, para la generación de microchips.

La ecuación 3.1 presenta un error casi constante superándose los 35 centímetros estabilizándose a 4,2 pF.

Tras valorar los resultados obtenidos en interior, se presentan los valores en exterior con el elemento de medida LCR(inductor, capacitor, resistor), la tabla de la figura 5.6 recoge los valores obtenidos:

Distancia cm	Capacidad (medida pF a 0.9m)	Capacidad (medida pF/m)	Capacidad (teórica pF/m)	Error%
2,5	15,01	16,67	8,6366	99,98%
5	11,7	13	7,1063	99,98%
7,5	10,5	11,67	6,4389	99,98%
10	9,3	10,33	6,0367	99,98%
12,5	8,7	9,67	5,7577	99,98%
15	8,2	9,11	5,5482	99,98%

Figura 5.6: tabla de valores medidos en espacio exterior

Las medidas en espacio exterior presentan una disparidad muy elevada respecto el resultado teórico, pero un comportamiento prácticamente ideal.

Las medidas en espacio exterior se realizan en saltos de 2,5 cm hasta 15 cm, se espera un error entre el 10% y el 40%.

Los resultados obtenidos mantienen un error constante del 99,98% superior al valor teórico. El principal factor causante del error es que el LCR sea flotante y no esté conectado a tierra, por lo que las cargas no se drenan.

La conclusión obtenida de las medidas en espacio exterior, es el comportamiento prácticamente idéntico al teórico, modelando una curva paralela a la gráfica de la figura 3.2.

Siendo superior la precisión del analizador del laboratorio, se toma como referencia real, aun obteniendo un error del 30% para los primeros 10 cm.

Experimento práctico 2

En el experimento 2, se realizan las medidas de la capacidad parásita que modela la ecuación 3.4, se diseña de forma teórica en el capítulo 4, en el apartado “diseño del experimento 2”.

El amplio número de factores produce un alto porcentaje de error, obteniéndose un comportamiento dispar respecto al valor teórico.

Las medidas se realizan con separaciones progresivas del plano de masa de 2,5 cm verticales, entre 2,5 cm y 15 cm. Para distancias entre conductores de 2,5 cm, 5 cm y 7,5cm.

El primer valor representa la medida sin el plano de masa y la segunda medida con el plano de masa a 0.3 cm.

La tabla de la figura 5.7 presenta las medidas obtenidas para 2,5 cm entre los conductores paralelos.

Distancia (cm)	Capacidad (medida pF a 0.9m)	Capacidad (medida pF/m)	Capacidad (teórica pF/m)	Error%
0	8,03	8,92	8,64	-3,24
0,3	1,58	1,76	0,48	-266,67
2,5	3,5	3,89	2,93	-32,76
5	5,18	5,76	3,71	-55,26
7,5	6,06	6,73	3,99	-68,67
10	6,8	7,56	4,14	-82,61
15	7,25	8,06	4,25	-89,65

Figura 5.7: tabla de valores con 2 hilos a 2,5 cm y plano variando distancia

El porcentaje de error sufre grandes fluctuaciones, creciendo cuando mayor es la distancia, disparándose a partir de 7,5 cm.

Se presenta el comando para la ejecución de Matlab de la ecuación 3.4 que representa los valores teóricos para dos hilos paralelos a 2,5 cm y el plano de masa con incrementos verticales de 2,5 cm.


```
>> fil1pla (1,0.15,0.025,0.001,6)
```

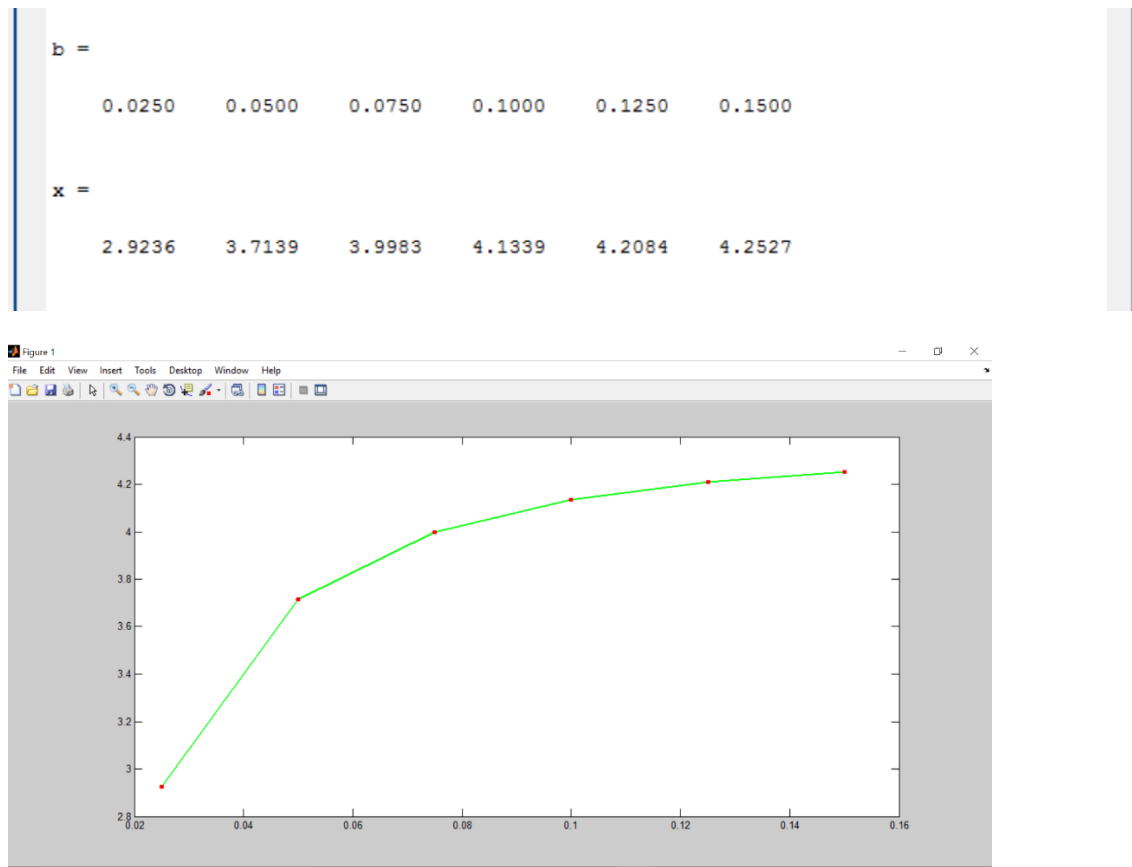


Figura 5.8: Valores y representación de Matlab de ecuación 3.4 para 2,5 cm

(eje x: distancia vertical en metros entre plano de masa y par de conductores paralelos,
eje y: capacidad parásita en pF)

Distancia	Capacidad (medida 0.9m)	Capacidad (medida pF/m)	Capacidad (teórica)	Error%
0	5,99	6,66	7,11	6,34
0,3	0,235	0,26	0,12	-110,91
2,5	1,62	1,80	1,26	-42,86
5	2,95	3,28	2,11	-55,34
7,5	3,796	4,22	2,54	-66,05
10	4,5	5,00	2,81	-77,94
15	5,1	5,67	3,10	-82,80

Figura 5.9: tabla de valores con 2 hilos a 5 cm y plano variando distancia

Para el caso de 5 cm se obtiene un incremento progresivo en el porcentaje de error, modelando un comportamiento más parecido al ideal.

Se presenta el comando para la ejecución de Matlab de la ecuación 3.4 que representa los valores teóricos para dos hilos paralelos a 5 cm y el plano de masa con incrementos verticales de 2,5 cm.

```
>> fil1pla (1,0.15,0.05,0.001,6)
```

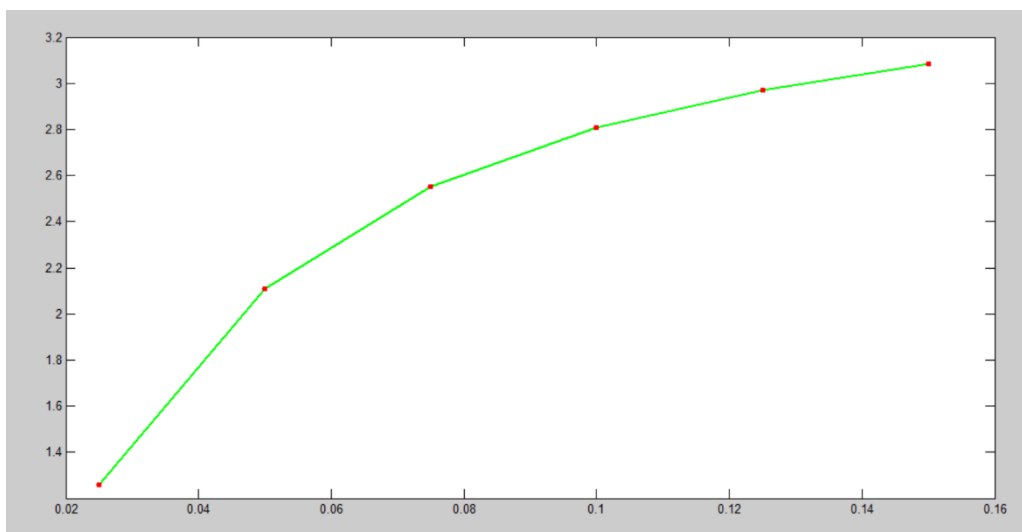
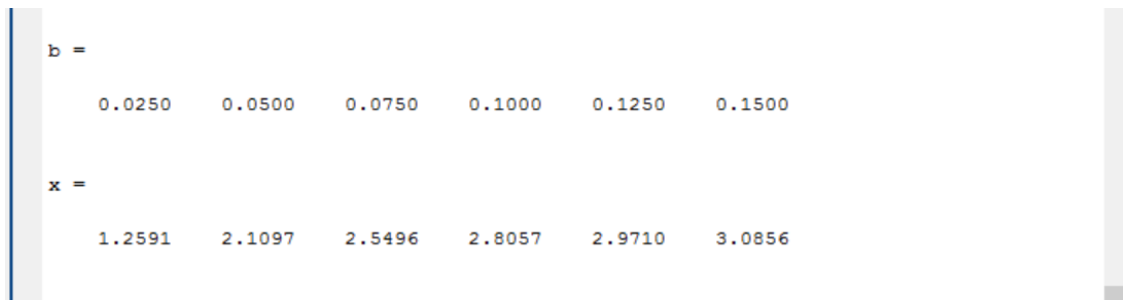


Figura 5.10: Valores y representación de Matlab de ecuación 3.4 para 5 cm

(eje x: distancia vertical en metros entre plano de masa y par de conductores paralelos, eje y: capacidad parásita en pF)

Distancia	Capacidad (medida 0.9m)	Capacidad (medida pF/m)	Capacidad (teórica)	Error%
0	4,50	5,00	6,44	22,35
0,3	0	0,00	0,06	100,00
2,5	0,51	0,57	0,67	15,17
5	1,54	1,71	1,34	-27,69
7,5	2,43	2,70	1,78	-51,69
10	2,7	3,00	2,07	-44,93
15	3,45	3,83	2,42	-58,40

Figura 5.11: tabla de valores con 2 hilos a 7,5 cm y plano variando distancia

Los valores obtenidos con una distancia entre conductores de 7,5 cm es la mejor de las realizadas, obteniéndose el menor error en todas las distancias entre el plano y los conductores.

Se presenta el comando para la ejecución de Matlab de la ecuación 3.4 que representa los valores teóricos para dos hilos paralelos a 7,5 cm y el plano de masa con incrementos verticales de 2,5 cm.

```
>> fil1pla (1,0.15,0.075,0.001,6)
```

```
b =
    0.0250    0.0500    0.0750    0.1000    0.1250    0.1500

x =
    0.6680    1.3392    1.7821    2.0729    2.2743    2.4210
```

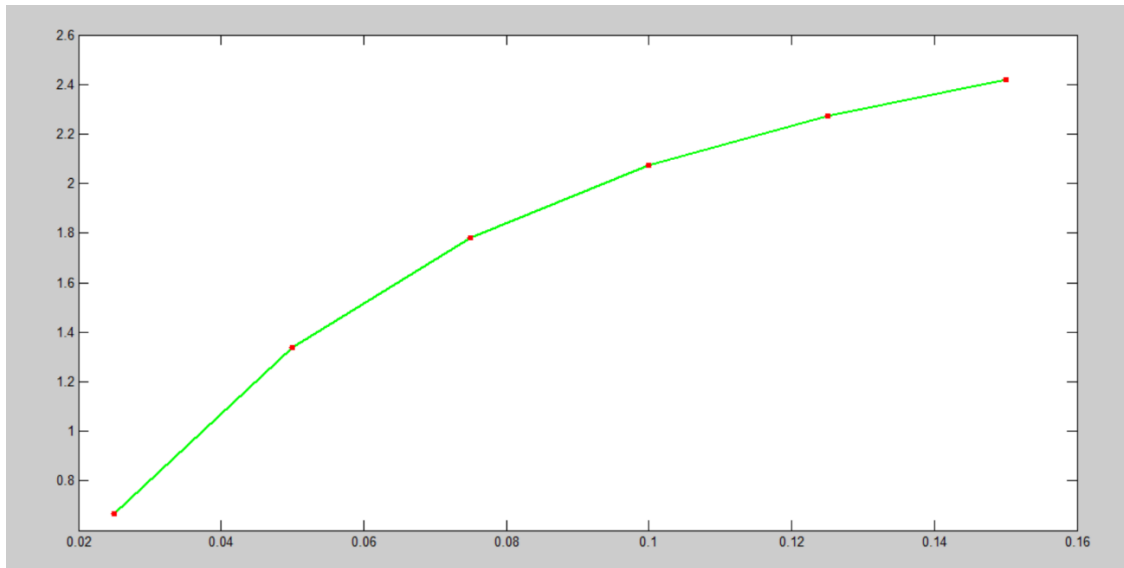


Figura 5.10: Valores y representación de Matlab de ecuación 3.4 para 7,5 cm

(eje x: distancia vertical en metros entre plano de masa y par de conductores paralelos, eje y: capacidad parásita en pF)

En el experimento práctico 2 se obtienen los valores más precisos para 7,5 cm. Se realizan medidas a 10 cm donde los resultados se disparan, decidiéndose 7,5 cm como distancia óptima.

El número de factores que afectan al ruido, provocan un gran error, pero se observa la gran afectación producida por el plano de masa.

6. "Pseudotheremin"

En el tercer experimento práctico se realiza el montaje del "Pseudotheremin", principal objetivo del proyecto.

El montaje se realiza mediante material reciclado de laboratorio y una programación desarrollada en Labview.

Se procede a la descripción del funcionamiento del experimento.

Se hace uso de la red eléctrica comprobando, con el multímetro del laboratorio, cuál de los polos del enchufe está en fase y cual está en neutro.

El circuito receptor se encuentra entre fase y neutro. Neutro está a 1 voltio de tierra, frente a 230 voltios nominales de corriente alterna y 320 voltios de pico, se considera despreciable. El circuito será el de la figura 6.1, antes de acercar ambos cables.

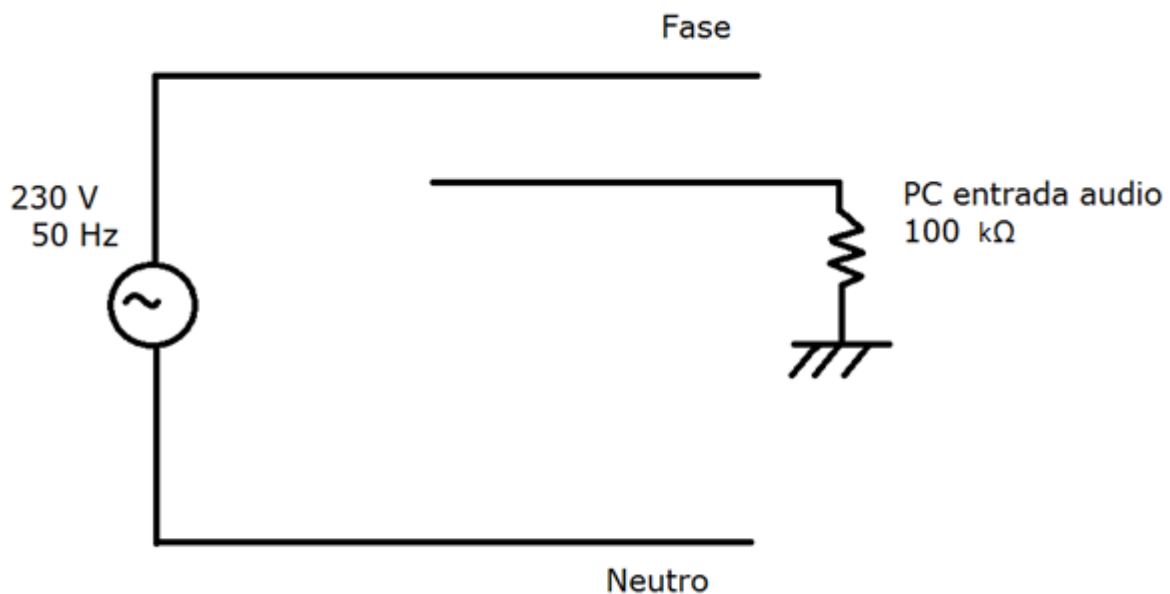


Figura 6.1: Circuito con cables independientes, a fase y a entrada de PC

El cable de Fase está conectado a 230 voltios nominales, el cable rojo en la figura 6.2. El cable negro recibe el campo eléctrico. Un extremo está conectado al aire y el otro extremo está conectado a la entrada de audio del ordenador. La entrada de audio del ordenador presenta una resistencia de $100\text{ k}\Omega$ aproximadamente.

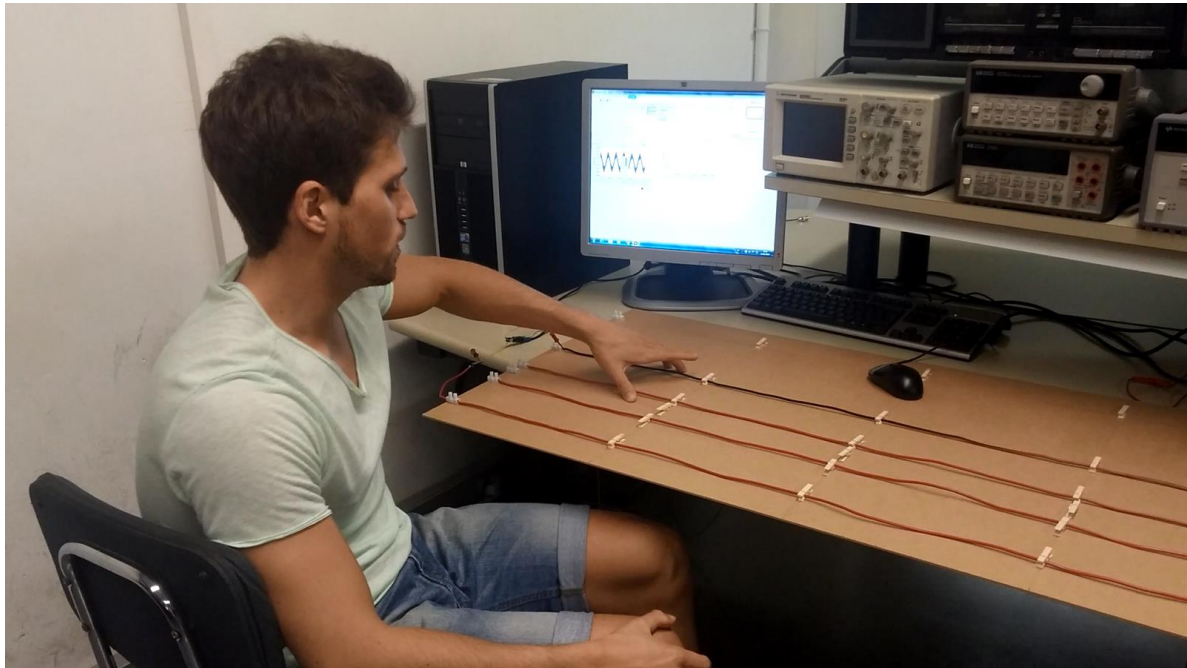


Figura 6.2: Pseudotheremin. Cables conectados a la red y a la entrada de audio del ordenador.

Los cables rojo y negro se hallan a los extremos del condensador en la figura 6.3. El cable rojo une el generador con el condensador y el cable negro, une el otro extremo del condensador con la resistencia de la entrada de audio. Se representa en la figura 6.3.

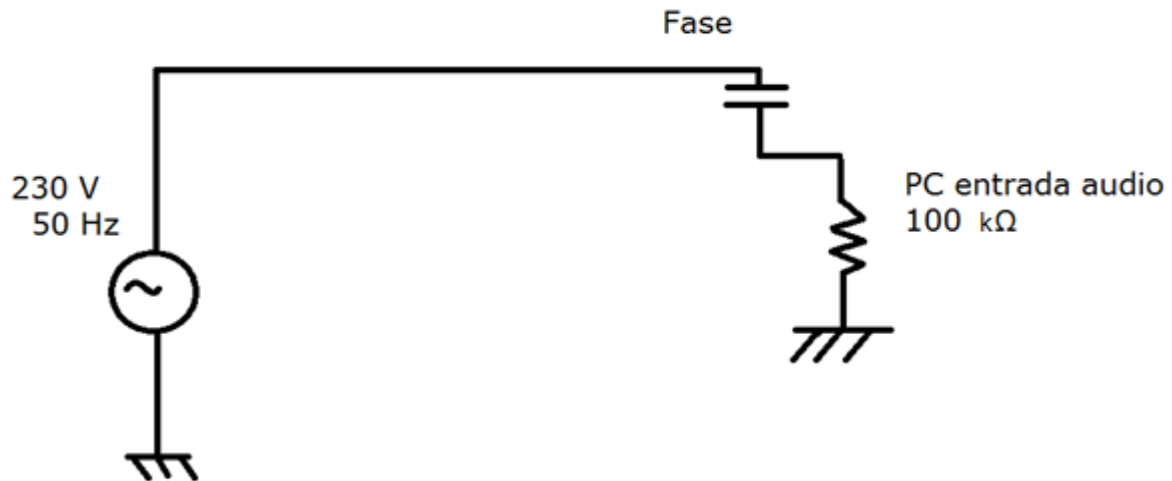


Figura 6.3: Circuito equivalente de modelo del "Pseudotheremin".

Se mide del orden de 10 pF de capacidad parásita a una frecuencia de 50 Hz y 10 cm entre conductores.

La impedancia que produce 10 pF a 50 Hz es del orden de 300 MΩ. La impedancia de 300 MΩ se halla entre los cables rojo y negro, producida por el aire y el recubrimiento de los cables. Se considera correcta por la afectación de los elementos del laboratorio.

Ecuación 6.1: Impedancia equivalente a 10 pF a 50 Hz.

$$Z \approx \frac{1}{2\pi fC} \approx \frac{1}{300 * 10^{-11}} \approx \frac{10^9}{3} \approx 300 \text{ M}\Omega$$

Conociendo la impedancia, se halla el voltaje de la señal de entrada realizado en la ecuación 6.2.

Ecuación 6.2: Voltaje de señal de la entrada de audio.

$$320 \text{ V}_p \frac{10^5}{3 * 10^8} \approx 0,1 \text{ V}$$

Se modela la señal de entrada de 0,1 voltios para convertirla en una señal audible.

Se desean obtener señales comprendidas entre los 2 kHz y los 14 kHz, decidiendo modularlo multiplicándolo por un seno y una constante de ajuste.

Para poder regular de forma independiente el volumen y el sonido, aprovechando una entrada de audio estéreo, se conectan dos conductores más formando otro circuito como el de la figura 6.3 independientes del anterior.

Un par de cables que forman la figura 6.3 regulará el volumen y el otro par de cables de la figura 6.3 regulará el Pitch.

El circuito equivalente final se constituye de dos circuitos como el de la figura 6.3 .

La ecuación que modela las constantes de ajuste y las variables que modificarán el volumen y el pitch es la siguiente:

Ecuación 6.3: Variable de ajuste de volumen y pitch

$$(A + k * V_{m1}) * \text{sen}(2\pi[f + k'V_{m2}]t)$$

Siendo k y k' constantes de ajuste V_{m1} y V_{m2} las entradas correspondientes al control de volumen y pitch respectivamente, siendo A una constante ambiente.

Se presentan imágenes de la programación y valores en Labview del experimento, comprobando que al variar la conductividad eléctrica al conectar el cuerpo humano a masa, el sonido varía radicalmente.

Se produce un cambio sustancial en la señal de entrada debido a la variación de la resistencia de 300 MΩ.

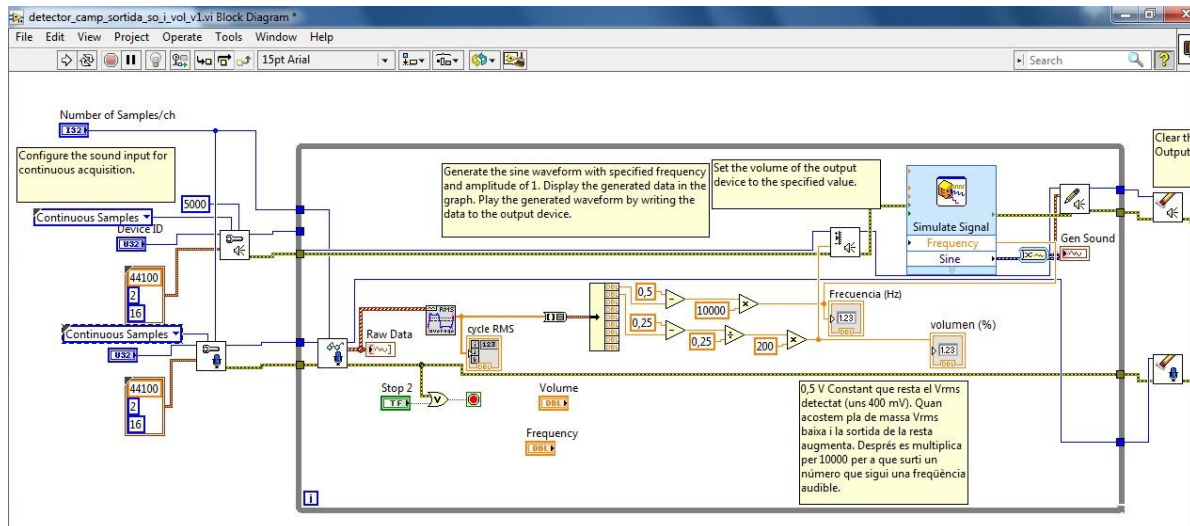


Figura 6.4: Programación del “Pseudotheremin” en Labview

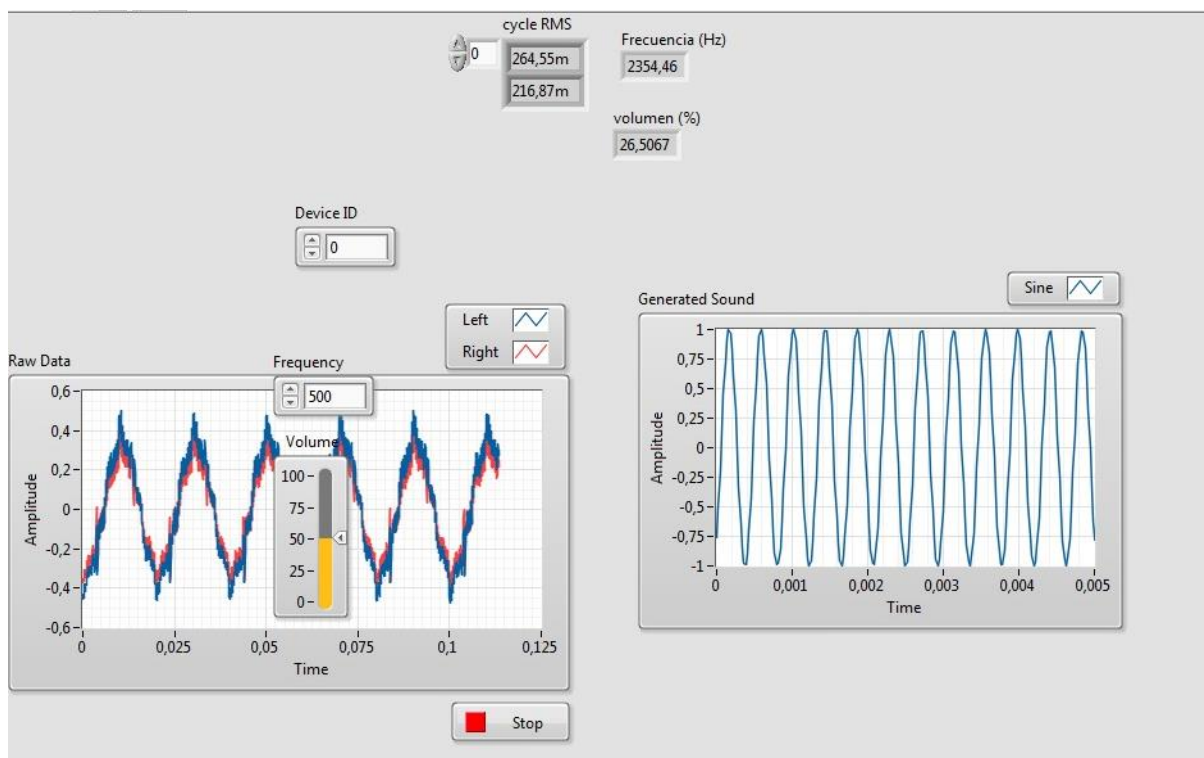


Figura 6.5: Valor de las variables que regulan pitch y volumen.

7. Conclusiones

Se han conseguido todos los objetivos propuestos en el desarrollo de este proyecto, valorándolo de forma positiva tanto a corto como largo alcance.

Se programaron las ecuaciones que modelan el experimento práctico que se realiza en los temas cinco y seis, obteniendo un resultado satisfactorio, comprobando los resultados con Wolfram Alpha.

Los experimentos se diseñaron según el material disponible, buscando el máximo ahorro.

El primer experimento práctico se realizó idéntico a su diseño. Las medidas realizadas sirvieron para modelar el comportamiento de la capacidad parásita, obteniendo unos resultados que definían una evolución equivalente a la teórica.

El segundo experimento práctico se realizó idéntico a su diseño. Las medidas se realizaron correctamente, no obstante los múltiples factores elevaron el porcentaje de error.

El tercer experimento, entorno el que gira todo el proyecto, es la creación del "Pseudotheremin". Experimento en el que se ha obtenido el resultado más satisfactorio.

Se ha conseguido que el "Pseudotheremin" creado varíe el volumen y el pitch. Pudiendo diferenciar entre un material conductor y un aislante gracias a la señal sonora del "Pseudotheremin".

Variando la conductividad, aislando y conectando a tierra diferentes materiales, se experimenta una notoria variación del sonido.

Finalmente todos los objetivos definidos en la introducción y nacidos durante el desarrollo del proyecto se han llevado a cabo obteniendo resultados positivos.

8. Referencias

Bibliografía

Libro: "Capacitance, Inductance and Crosstalk Analysis"

Autor: Charles S. Walker Editorial: Artech House

Libro: "Agilent Impedance Measurement Handbook"

Autor: Agilent Technologies

Libro: "Computer Manual in MATLAB to Accompany Pattern Classification" (Electrical & Electronics)

Autor: David G. Stark & Elad Yom Tov

Libro: "Electromagnetismo conceptos y aplicaciones (Cuarta edicion)"

Autores: Stanley V. Marshall, Richard E. DuBroff, Gabriel G. Skitek

Editorial: Prentice Hall

Libro: "Operation and service manual" "Model hp4192A LF IMPEDANCE ANALYZER"

Libro: "LCR Elite 1 User manual"

Autor: LCR Research